

При изменении степени уплотнения поверхностных слоев древесины в диапазоне от 0,5 до 2,0 мм наилучшие результаты показали образцы с уплотнением в 1,5 мм. Следовательно, пористо-сосудистое анатомическое строение древесины, характеризующееся наличием сосудов, сердцевинных лучей и различного рода микро- и макрополостей, соединенных между собой системой пор возможно наполнять различными составами и уплотнять разными механическими способами, в частности одноосным сжатием в плитах пресса [2]. Под действием больших нагрузок в древесине появляются необратимые остаточные деформации, пластическое течение. Они изменяют физико-механические свойства древесины [3].

Механическое уплотнение, тепловая, химико-механическая и химическая обработка древесины изменяют ее твердость, временные упругие и остаточные деформации. Пропитка, наполнение смолами (полимеризация) и последующее уплотнение значительно улучшают эксплуатационные особенности модифицированной древесины осины, расширяя области применения такой древесины в народном хозяйстве.

Библиографический список

1. Винник Н.И. Модифицированная древесина: учеб. пособие [для вузов] / Н.И. Винник. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 160 с.
2. Перелыгин Л.М. Древесиноведение: учеб. пособие / Л.М. Перелыгин; под. общ. ред. доц. Б.Н. Уголева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1969. – 320 с.
3. Коротаев Э.И. Использование мягкой лиственной древесины: учеб. пособие / Э.И. Коротаев, М.И. Клименко; – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 128 с.

А.А. Воробьев, И.Н. Спицын, Ю.А. Филиппов
СибГТУ, г. Красноярск, РФ
stanki@sibstu.kts.ru

**ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОЦЕССА
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОТ ВИБРОСКОРОСТИ С УЧЕТОМ
АНИЗОТРОПИИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ
(PRODUCTION OF DEPENDENCE OF THE ROUGHNESS OF PROCESS
OF MILLING FROM VIBROSPEED TAKING INTO ACCOUNT
ANISOTROPY OF THE ULTIMATE STRENGTH OF WOOD)**

Представлены результаты исследований по установлению взаимосвязи анизотропии предела прочности древесины сосны Сибирской с компонентом вибрации процесса фрезерования и параметром шероховатости обработанной поверхности. На основании имитационного твердотельного моделирования методом конечных элементов был получен параметр, отражающий технологические свойства, учитывающий механические характеристики обрабатываемой древесины.

Results of researches on an establishment of interrelation of anisotropy of an ultimate strength of wood of a pine Siberian with component of vibration of process of milling and parameter of a roughness of a treated surface are presented. On the basis of imitative solid-state

modelling by a method of final elements the parametre reflecting technological properties, noting mechanical characteristics of treated wood has been received.

Современный этап развития деревообрабатывающей отрасли характеризуется повышением требований к качеству обработки деталей, в частности производства мебели. Это предполагает совершенствование технологического оборудования и прежде всего назначение рациональных режимов обработки с учетом виброактивности дерево-режущих станков для улучшения параметра шероховатости обработанной поверхности и получения заданной точности изделий мебели.

При моделировании процесса резания древесины следует учитывать, что она является анизотропным материалом, ее свойства различаются в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Основными параметрами, характеризующими упругие деформации древесины являются: модуль упругости, E ; коэффициент Пуассона, μ ; модуль сдвига, G .

Между данными параметрами существует зависимость [1]

$$G = E/2 \cdot (1 + \mu) \quad G = E/2 \cdot (1 + \mu). \quad (1)$$

Согласно закону Гука относительная продольная деформация ε соответствует отношению:

$$\varepsilon = \sigma / E \quad \varepsilon = \sigma / E, \quad (2)$$

где σ – нормальное напряжение.

Для системы координат закон Гука (2) может быть записан в виде [1].

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \cdot \sigma_z \\ \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\mu_{zy}}{E_z} \cdot \sigma_z \\ \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\mu_{xz}}{E_x} \cdot \sigma_x \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_{yz}} \\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_{zx}} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \cdot \sigma_z \\ \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\mu_{zy}}{E_z} \cdot \sigma_z \\ \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\mu_{xz}}{E_x} \cdot \sigma_x \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_{yz}} \\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_{zx}} \end{array} \right.$$

Целевую функцию шероховатости фрезерованной поверхности детали для имитационного моделирования можно записать в виде [2, 3, 4, 5]:

$$Ra = \chi_i T, \quad (4)$$

где χ_i – коэффициент связи, зависящий от класса точности станка;

T – операционный допуск на размер детали, мм.

Компоненты вибрации в механических системах описываются первым уравнением виброперемещения точки и (или) поверхности в общем случае согласно ГОСТу 24347-80:

$$S_v = S_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где S_0 – амплитуда поперечных колебаний механизма резания;

$(\omega t + \varphi)$ – фазовый угол;

ω – вынужденная частота процесса;

φ – начальный фазовый угол.

А также вторым кинематическим уравнением, полученным дифференцированием (5), описывающим изменение компоненты виброскорости:

$$V_v = \omega S_0 \cos(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Из классической механики известно, что функция скорости в общем случае является первой производной от перемещения S по времени:

$$V = dS / dt. \quad (7)$$

Анализ механики технологического процесса фрезерования древесины и физических явлений при стружкообразовании позволяет представить функцию (7) в следующем виде:

$$S_v = \int_{t_0}^{t_1} V_v dt, \quad (8)$$

где S_v – виброперемещение режущего инструмента;

V_v – виброскорость механизма главного движения;

t_0 и t_1 – характерное время процесса.

Параметр шероховатости Rz по ГОСТу 7016 оценивается величиной суммы максимального выступа неровности и значением наибольшей впадины от нейтральной линии [6], что эквивалентно размаху колебания или двойной амплитуде виброперемещения (рис. 1).

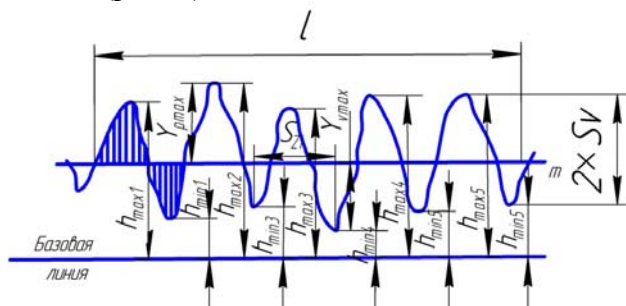


Рис. 1. Сравнение амплитуды виброперемещения и параметра шероховатости

Таким образом, можно записать, что значение параметра шероховатости равно удвоенной амплитуде виброперемещения:

$$Rz = 2S_V \quad (9)$$

Подставляя вместо S_V его значение, согласно формуле (8), получим:

$$Rz = 2 \cdot \int_{t_0}^{t_1} V_V dt. \quad (10)$$

Так, при $V_V = \text{const}$, $t_0 = 0$, а также $t_1 = 60/(nz^x)$, учитывая особенности процесса резания древесины и динамики стружкообразования при фрезеровании после преобразования уравнения (10), получаем базовое уравнение шероховатости в зависимости от пиковой виброскорости:

$$Rz = 2V_{sp}\psi k \frac{60}{nz^x}, \quad (11)$$

где V_{sp} – пиковая виброскорость механизма главного движения, мкм/с;

ψ – параметр технологических свойств, зависящий от механических характеристик обрабатываемой древесины;

k – коэффициент динамичности, зависящий от частотных характеристик упругой системы станка и режущего инструмента;

n – частота вращения шпинделя с инструментом, мин⁻¹;

z – число зубьев в инструменте;

x – показатель степени, который характеризует качество подготовки режущего инструмента ($x = 3$ – для прецизионного инструмента; $x = 2$ – для твердосплавного инструмента; $x = 1$ – для стального инструмента).

Отличительной особенностью функции (11) является учет в ней механических и технологических свойств обрабатываемого материала с помощью нового параметра физико-механических свойств древесины, представляющего соотношение величины напряжения, возникающего в зоне резания к исходному значению напряжения до процесса резания. Характеристическое уравнение для определения параметра имеет вид:

$$f(\psi) = \sigma_{\max} / \sigma_0, \quad (12)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в зоне резания, МПа;

σ_0 – начальное напряжение, МПа.

Данный параметр был определен на основе имитационного моделирования процесса резания в программной среде SolidWorks. Для определения силовых показателей процесса фрезерования использовалась разработанная авторская прикладная программа CutWood написанная на языке программирования Delphi.

В результате расчета силовых показателей фрезерования при твердотельном моделировании в среде SolidWorks использовалось полученное значение величины средней касательной силы резания F_{xcp} (силы, действующей на одном ноже).

Следует учитывать, что значения постоянных параметров упругости древесины бывают различными даже для одной породы в результате воздействия множества факторов, таких как: условия произрастания древесины; непостоянство свойства по длине стола; влажность древесины; ширина годичных слоев; процентное содержание ранней древесины; строение клеточных стенок и сердцевинных лучей; отличия в способах измерения деформаций и другие факторы.

Таким образом, следует определять эти параметры по их соотношениям, которые дают более точные результаты. Так, для породы «сосна» приведены следующие значения: соотношение модуля упругости – 1,93; коэффициент Пуассона – 1,21; модуль сдвига – 1,71 [1].

Интерес представляет соотношение напряжений при сжатии древесины породы сосны для проверки теоретического положения о значении введенного параметра технологических свойств. Отношение напряжений для сжатия составляет 1,83. График экспериментальной зависимости приведен на рисунке 2а [1]. Результаты твердотельного моделирования методом конечных элементов в среде SolidWork, представлены на рис. 2б.

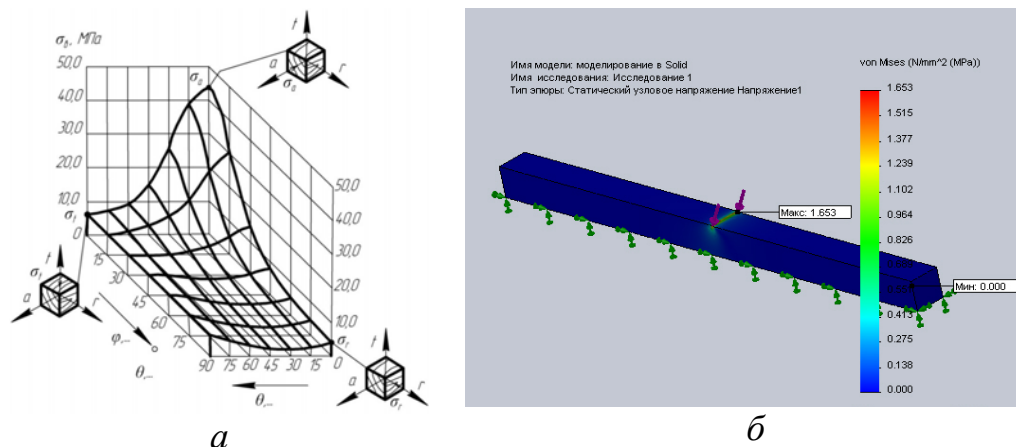


Рис. 2. Анизотропия предела прочности древесины сосны: а – при сжатии; б – твердотельное моделирование в программной среде SolidWorks

Подставляя значения полученных напряжений в уравнение (12), получаем величину параметра свойств древесного материала в диапазоне $\psi = 0,85/1,70$, что соответствует приведенным выше экспериментальным значениям.

Для подтверждения принятой гипотезы о численной связи параметра шероховатости фрезерованной поверхности древесины с компонентами вибрации станка, обработки физических явлений выполнены экспериментальные исследования.

Экспериментальная установка создана на базе универсального горизонтального консольно-фрезерного станка модели 6Т82Г-29, который соответствует требованиям норм точности и жесткости согласно ГОСТу 17734-88 (рис. 3).

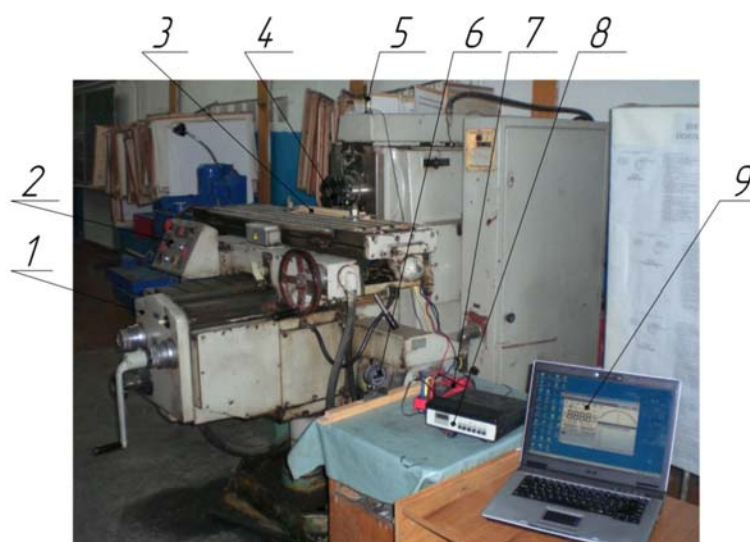


Рис. 3. Экспериментальная установка:

- 1 – стол; 2 – пульт управления; 3 – заготовка; 4 – сборная фреза;
- 5 – пьезоэлектрический датчик ДП-12; 6 – электронный индикатор МІВ;
- 7 – токовые клещи UT232; 8 – виброметр ВВМ-201; 9 – ноутбук

Для получения уравнений регрессии выбрана методика В-планов второго порядка от трех факторов В3. Обозначение факторов и уровней их варьирования представлено в таблице.

Обозначение факторов и уровней их варьирования

Наименование фактора	Обозначение		Интервал варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
	натуральное	нормализованное		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)
Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹	n	x_1	600	400	1000	1600
Скорость подачи, мм/мин	V_s	x_2	30	20	50	80
Глубина фрезерования, мм	t	x_3	0,95	0,1	1,05	2,0

В результате обработки экспериментальных данных с использованием авторской прикладной программы расчета В-планов второго порядка *B_plans* (свидетельство о государственной регистрации № 2011616377) были получены приведенные ниже уравнения регрессии.

Уравнение регрессии для виброскорости имеет вид:

$$Vv(n, V_s, t) = 0,8079 + 0,00014n + 0,0012V_s - 0,03754t - 0,000000013n^2 - 0,0000044V_s^2 + 0,000000056nV_s - 0,00007V_st - 0,0000053nt. \quad (13)$$

Уравнение регрессии для шероховатости поверхности:

$$Rm(n, V_s, t) = 52,4 - 0,01n + 0,601V_s + 3,714t + 0,00096V_s^2 - 0,000183nV_s + 0,0184V_st - 0,00114nt. \quad (14)$$

Для нахождения зависимости параметра шероховатости Rm от виброскорости подставим в соответствующее уравнение регрессии массивы аргументов (режимы резания), в результате получим векторы значений функций, произведя аппроксимацию которых, получим аналитическую функциональную зависимость.

Наиболее точную аппроксимацию для зависимости шероховатости от виброскорости дает разложение по полиномам Чебышева, которое после преобразований имеет вид:

$$Rm(V_v) = -255,108V_v^2 + 624,083V_v - 291,844. \quad (15)$$

График зависимости шероховатости от виброскорости представлен на рис. 4.

Расхождение теоретических данных от экспериментальных для зависимости шероховатости от виброскорости – 7,6 %.

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Определен параметр, характеризующий изменение свойств древесины при напряженно деформированном состоянии в физическом процессе резания со стружкообразованием, влияющий на изменение компонент вибрации в пределах от 0,85 до 1,70 в зависимости от породы и физико-механических свойств (плотность, модуль упругости 1 и 2-го родов влажности) древесины.

2. Разработаны математические модели, позволяющие определить и исследовать шероховатость фрезерованной поверхности, виброскорость фрезерного станка в зависимости от технологических режимов обработки.

3. Получены регрессионные модели для виброскорости и шероховатости. Произведенное сравнение теоретических и экспериментальных данных показало, что расхождение между ними составляет не более 10 %, в том числе по параметрам: виброскорости – 5,3 %; шероховатости – 9,6 %.

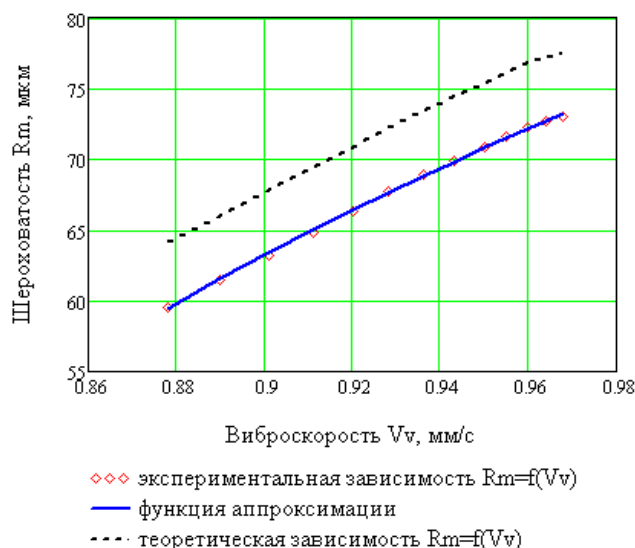


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от компонент вибрации виброскорости и виброускорения

Библиографический список

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия конструкционных материалов: справочник / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 247 с.
2. Воробьев А.А. Улучшение качества фрезерованных деталей мебели на основе снижения вибрации технологического оборудования: автореф. на соиск. уч. степ. к.т.н.: 05.21.05 : дата защиты 11.02.11 / А.А. Воробьев. – Красноярск, 2010. – 20 с.
3. Воробьев А.А. Установление зависимости шероховатости поверхности древесины от показателей вибрации станка / А.А. Воробьев, Ю.А. Филиппов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2010. – № 2. – С. 6–7.
4. Филиппов Ю.А. Особенности технологии восстановления работоспособности ленточнопильных станков / Ю.А. Филиппов, И.Н. Спицын, А.А. Воробьев, И.С. Корчма // Справочник. Инженерный журнал. – 2010. – № 6. – С. 6–9.
5. Филиппов Ю.А. Синтез виброактивности деревообрабатывающих машин: монография / Ю.А. Филиппов. – Красноярск: КГТА, 1996. – 261 с.
6. ГОСТ 7016-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности. – Взамен ГОСТ 7016-75; введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 5 с.